

CONCEPTUAL SCHEME OF INTELLIGENT VESSEL TRAFFIC CONTROL SYSTEM WITH THE HUMAN FACTOR INCLUDED

S. G. Fadyushin

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

The subject of the research is the development of technologies for automated and automatic ship traffic control systems, which is of great importance in modern shipping conditions. At the same time, special attention is paid to intelligent control systems based on artificial intelligence methods, such as artificial neural networks, fuzzy logic, machine learning, evolutionary computing and genetic algorithms. As a result, integrated information navigation systems, which provide decision-making on all aspects of navigation tasks, primarily where reception, processing, storage and transmission of navigation information is required, are being created and widely used in practice. However, in such developments, due importance is not given to the human factor, namely, it is often not taken into account that the control system of a moving object is a man-machine and consists of a regulator, which includes a human operator (navigator). The inclusion of the navigator in the vessel control link leads to the need to simultaneously take into account the human factor and the characteristics of the vessel controllability, i. e. human and machine factors in their unity. In connection with the development of artificial intelligence, the concept of “human-machine symbiosis” is becoming increasingly relevant in the study of human-machine systems. The problem is that there is still no single point of view on this issue due to the lack of reasonable methods for taking into account the human factor in the process of controlling the movement of moving objects. The results of the theoretical research on the formalization of some aspects of human mental activity and their implementation in the conceptual scheme of an intelligent vessel control system are reflected in the paper. The results obtained may be of interest to specialists in vessel traffic control automation, artificial intelligence, the creation of intelligent control systems and navigation safety.

Keywords: navigation, the human factor of navigation, navigation safety, vessel control, entropy, information, intelligent system, unmanned vessel.

For citation:

Fadyushin, Sergey G. “Conceptual scheme of intelligent vessel traffic control system with the human factor included.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.2 (2023): 180–190. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-180-190.

УДК 656.61.052

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ СХЕМА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ СУДНА С УЧЕТОМ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА

С. Г. Фадюшин

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Российская Федерация

Темой исследования является имеющая большое значение в современных условиях судоходства разработка технологий автоматизированных и автоматических систем управления движением судна. При этом особое внимание уделяется интеллектуальным системам управления на основе методов искусственного интеллекта, таких как искусственные нейронные сети, нечеткая логика, машинное обучение, эволюционные вычисления и генетические алгоритмы. В результате создаются и находят широкое применение на практике интегрированные информационные навигационные комплексы, обеспечивающие принятие решений судоводителем прежде всего там, где требуется прием, обработка, хранение и передача навигационной информации. Однако в таких разработках не уделяется должного внимания человеческому фактору, а именно зачастую не учитывается, что система управления подвижным объектом является частью человеко-машинной системы, в состав которой входят: регулятор (машина) и человек-оператор (судоводитель). Включение судоводителя в звено управления судном приводит к необходимости одновременно учитывать человеческий фактор и характеристики управляемости судна, т. е. человеческий и машинный факторы

одновременно. В связи с развитием искусственного интеллекта понятие «симбиоза человека и машины» становится все более актуальным в исследованиях человеко-машинных систем, однако проблема состоит в том, что пока не существует единой точки зрения по данному вопросу ввиду отсутствия обоснованных методик учета человеческого фактора в процессе управления движением подвижных объектов. В статье отражены результаты проведенных теоретических исследований по формализации некоторых аспектов мыслительной деятельности человека и реализация их в концептуальной схеме интеллектуальной системы управления судном. Полученные результаты могут представлять интерес для специалистов по автоматизации управления движением судна, искусственному интеллекту, созданию интеллектуальных систем управления и безопасности мореплавания.

Ключевые слова: судовождение, человеческий фактор судовождения, безопасность судовождения, управление судном, энтропия, информация, интеллектуальная система, безэкипажное судно.

Для цитирования:

Фадюшин С. Г. Концептуальная схема интеллектуальной системы управления движением судна с учетом человеческого фактора / С. Г. Фадюшин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 2. — С. 180–190. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-180-190.

Введение (Introduction)

Автоматизация управления подвижными объектами является перспективным направлением развития кибернетики. Уже сейчас современные информационные технологии позволяют автоматизировать процесс управления движением морского судна и перейти к беспилотному вождению безэкипажного судна. Однако даже при автоматизации судовождения на безопасности плавания сказывается влияние *человеческого фактора*, который по разным статистическим данным является главной причиной в 70–80 % случаев аварий и других инцидентов на море. Так, по статистическим данным обзора аварийности с судами на море за I квартал 2022 г., из семи аварий пять случаев (71 %) произошло по причине некомпетентности или неправильных действий членов экипажа судов, т. е. так называемого *человеческого фактора* [1].

Современные технологии автоматизации управления подвижными объектами по-прежнему требуют контроля со стороны оператора и его вмешательства в процесс управления в сложных ситуациях. Всецело полагаясь на автоматизацию, человек-оператор часто теряет контроль над управлением, что не лучшим образом сказывается на безопасности движения. Поэтому не случайно в ходе исследования взаимодействия человека и машины в автоматизированных системах управления отмечается важность учета прежде всего *человеческого фактора* [2], [3]. При разработке интеллектуальных систем автоматического управления в настоящее время широко используются методы системного анализа, математической статистики, спектрального анализа случайных процессов, теории искусственных нейронных сетей, нечеткой логики, генетических алгоритмов, имитационного моделирования, т. е. методы, находящиеся в основе общей теории управления — кибернетики. Данные методы занимаются исследованием «петель обратной связи», когда функционирование какой-либо системы приводит к некоторым изменениям в окружающей среде, вызывающим через обратную связь трансформацию поведения самой системы.

Принцип обратной связи, наблюдаемой в технике, был использован американским математиком Н. Винером для формализации сознательной деятельности человека и положен им в основу науки об управлении — кибернетики. Так, в работе [4, с. 31] отмечается следующее: «...*исключительно важным фактором в сознательной деятельности служит явление, которое в технике получило название обратной связи <...> Чтобы некоторое устройство выполняло заданное движение, разница между заданным и фактическим движением используется как новый входной сигнал, заставляющий регулируемую часть устройства двигаться так, чтобы фактическое движение устройства все более приближалось к заданному.*»

Принцип обратной связи — универсальный принцип управления, позволяющий в изменяющейся среде достигать поставленной цели, который заключается в коррекции входных воздействий в процессе управления, формирующемся на основе информации о выходе управляемой системы.

Управляемая система вместе с регулятором, корректирующим входные воздействия, образует замкнутый контур, так называемый *контур обратной связи* (рис. 1).

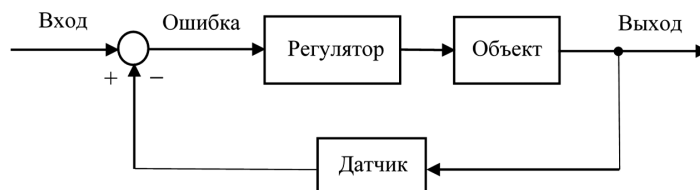


Рис. 1. Контур обратной связи

На рис. 1 приняты следующие условные обозначения: *ошибка* — разностный сигнал между эталонным сигналом на входе и сигналом на выходе; *регулятор* (корректирующий элемент, фильтр) — элемент, с помощью которого обеспечиваются приемлемые характеристики системы в целом; *объект* — часть системы, которая подлежит управлению; *датчик* — устройство для измерения сигнала. Указанные элементы образуют одноконтурную замкнутую систему управления [5].

Обратная связь в кибернетике считается не только возможной, но и необходимой как в системах автоматического управления машинами, так и во всех живых организмах. Все управляемые системы (кибернетические системы) можно считать объектами кибернетики, в том числе *интеллектуальную систему управления судном*. Однако в исследованиях часто не учитывается, что это человеко-машинная система, в состав регулятора которой входит человек-оператор, т. е. судоводитель [6]. Включение судоводителя в звено управления судном приводит к необходимости одновременно учитывать психологические характеристики человека и характеристики управляемости судна, т. е. *человеческий и машинный факторы*. Поэтому в случае смешанного управления подвижным объектом: человеком и машиной, появляется необходимость учета субъективной составляющей процесса управления, которая получила название *смысла действий* (the Sense of Agency) [7] оператора, или просто *смысла* (Sense). Понятие *симбиоз человека и машины* все чаще упоминается в исследованиях человеко-машинных систем. Тем не менее пока не существует единой точки зрения в вопросе, что представляет собой единство человека и машины [8]. Для решения проблемы человеко-машинных систем в данной работе предлагается концептуальная схема интеллектуальной системы управления движением морского судна, учитывающая *человеческий фактор*.

Методы и материалы (Methods and materials)

Концептуальная схема интеллектуальной системы управления движением морского судна, в основе которой находятся понятия теории вероятностной оценки смыслов [9], показана на рис. 2.

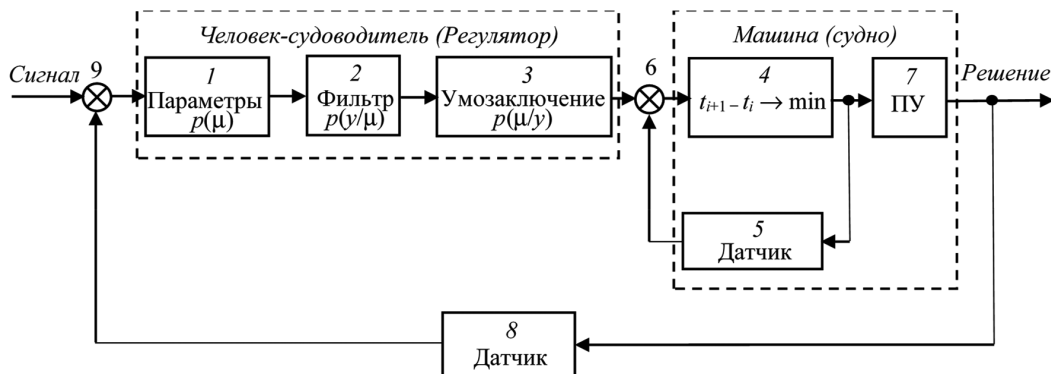


Рис. 2. Концептуальная схема интеллектуальной системы управления движением морского судна:

- 1, 2, 3 — блоки формирования управленческого решения (умозаключения);
- 4 — вычислительный блок; 5 — датчик интенсивности машинного фактора;
- 6 — элемент сравнения интенсивностей человеческого и машинного факторов;
- 7 — пульт управления (ПУ) машиной (судном); 8 — датчик навигационной переменной величины;
- 9 — элемент сравнения навигационной переменной величины и навигационного сигнала

Концептуальная схема интеллектуальной системы управления движением морского судна, приведенная на рис. 2, имеет два контура: внутренний контур управления (блоки: *Человек-судоводитель (Регулятор)*, *Машина (судно)*, элемент сравнения 6); внешний контур управления (блоки: *Человек-судоводитель (Регулятор)*, *Машина (судно)*, датчик 8, элемент сравнения 9). В состав схемы входят следующие основные блоки: 1–3 — блоки формирования управленческого решения. На рис. 2 они объединены пунктирной линией, т. е. представляют собой единый блок *Человек-судоводитель (Регулятор)* (см. рис. 1). В этом блоке судоводителем формируются логические умозаключения по управлению движением судна, в результате чего происходит образование концепта, называемого *человеческим фактором*¹.

Механизм умозаключения основан на силлогизме Бейеса — Налимова — «инструменте» выработки осмысленных решений, т. е. решений, содержащих смысл [10]. В структуре силлогизма Бейеса — Налимова смысл описывается своей функцией распределения $p(\mu)$ (блок 1), которая мультипликативно взаимодействует с фильтром $p(y/\mu)$ (блок 2). Взаимодействие описывается теоремой Бейеса и задается формулой в виде

$$p(\mu | y) = kp(y | \mu)p(\mu), \quad (1)$$

где $p(\mu | y)$ — условная функция распределения, определяющая семантику сделанного умозаключения;

k — константа нормировки.

По мнению советского и российского математика и философа В. В. Налимова, теорема Бейеса, представленная в виде формулы (1), выступает как силлогизм: из двух посылок $p(\mu)$ и $p(y/\mu)$ следует новая семантика $p(\mu/y)$, и в результате из отдельных семантических знаков² *формируется программа осмысленных действий человека (судоводителя)*.

Фильтр — это абстрактный элемент мышления, задающий условную функцию распределения $p(y/\mu)$, которая зависит от интенсивности принятия решений (умозаключений) судоводителем и, соответственно, оказывает влияние на интенсивность процесса управления судном в целом. Эта функция описывается законом Пуассона, согласно которому вероятность того, что количество принятых решений примет определенное значение, выражается формулой

$$P_m = \frac{a^m}{m!} e^{-a} (m = 0, 1, \dots),$$

где a — некоторая положительная величина, называемая *законом Пуассона*;

m — количество принятых решений на отрезке траектории l .

Закон Пуассона в контексте вероятностной теории смыслов — это закон, описывающий работу фильтра. В качестве примера единичного логического умозаключения на рис. 3 показана априорная функция распределения семантических знаков. Видно, что с каждым знаком вероятностным образом связано множество смысловых значений. Ранги смысловых значений отложены по оси абсцисс μ и распределены по вероятности их появления $p(\mu)$, определяемой по оси ординат. Таким образом, каждому участку смысловой шкалы соответствуют свои вероятности, с которыми они ассоциируются с определенным знаком в сознании человека. Поэтому соответствующие им функции распределения могут быть названы *априорными* (субъективными, персональными, человеческими) функциями, формирующими *человеческий фактор*.

Принимаемое решение должно быть осмысленным, т. е. *содержать смысл или быть сознательным, разумным*. На рис. 3 показано, что смысл заключен между семантическими знаками. Если знаки выразить к единицам информационной энтропии H , то отрезок между знаками (в данном случае отрезок 3) определяет величину смысла между ними — квант смысла ΔH :

$$\Delta H = |H(\text{знак 1}) - H(\text{знак 2})|.$$

¹ В данной работе выражение «формируются умозаключения» тождественно понятию «принимаются решения» или «принятие решений». «Принятие решения» означает заключительное итоговое умозаключение, за которым следует управляющее действие лица, принимающего решения.

² В контексте темы данного исследования семантические знаки представляют собой навигационные сигналы различной природы, поступающие на вход системы.

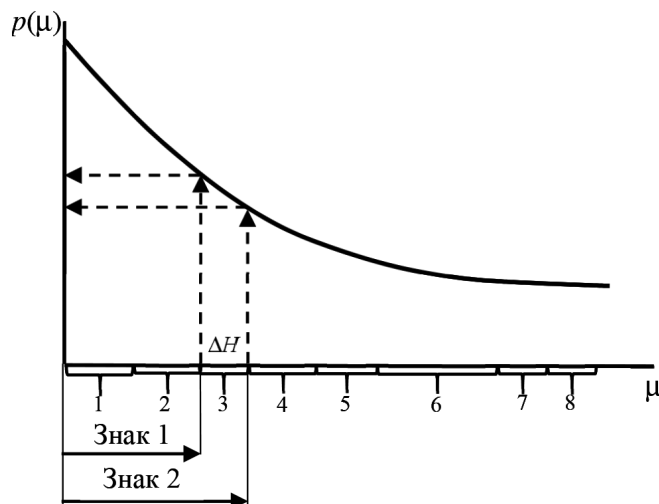


Рис. 3. Формирование логического умозаключения

Информационную энтропию можно рассчитать по формуле К. Шеннона:

$$H = -\sum p_i \log p_i,$$

где H — энтропия множества вероятностей p_i ;

p_i — вероятность появления какого-либо семантического знака.

Квант смысла представляет собой случайную величину. Содержащий смысл код, состоящий из цепочки взаимосвязанных квантов смысла, можно охарактеризовать статистическими параметрами экспоненциального распределения непрерывной случайной величины. Формальным аналогом информационной энтропии по К. Шеннону для непрерывной случайной величины является *дифференциальная энтропия*, т. е. понятие смысла оказывается тождественным понятию дифференциальной энтропии. Отсюда следует, что *смысл* — это статистический параметр семантической функции распределения квантов смысла в виде экспоненциального распределения, измеряющий среднее количество дифференциальной энтропии, приходящейся на одно умозаключение в виде силлогизма Бейеса – Налимова. В более краткой формулировке смысл — это статистический параметр, измеряющий среднее количество энтропии, приходящейся на одно умозаключение.

Как отмечалось ранее, каждому участку смысловой шкалы (см. рис. 3) соответствуют свои вероятности, с которыми они ассоциируются со знаком в сознании человека (судоводителя), поэтому соответствующие им функции распределения — это субъективные (человеческие) функции. Отсюда следует, что смысл непосредственным образом связан с человеческим фактором. Тогда, по аналогии с формулировкой смысла, человеческий фактор судовождения можно охарактеризовать как статистический параметр, который измеряет среднее количество энтропии вероятностного состояния системы «судоводитель – судно», приходящееся на одно принятое судоводителем решение [11]. При этом следует учесть, что человеческий фактор формируется как бы «поверх» *детерминированного фактора*, т. е. принятию решения судоводителем должна предшествовать логическая проработка задачи управления в математическом (детерминированном) виде, результатом которой является программа управления движением судна U .

Таким образом, из приведенных основных положений теории вероятностной оценки смыслов следует, что мерой величины смысла (M) и, соответственно, человеческого фактора служит *дифференциальная энтропия* $h(\Delta H)$ как статистический параметр экспоненциального распределения случайной величины в виде квантов смысла: $M = f(h(\Delta H))$. Для количественной оценки величины смысла достаточно рассчитать и сравнить дифференциальную энтропию программы действий судоводителя M_s и соответствующей эталонной программы¹ M_p . Если $M_s > M_p$, то, вероятнее

¹ Эталонная программа действий судоводителя создаётся из исходной путем случайной перестановки знаков.

всего, принятые решения содержат смысл; если $M_s \leq M_p$, то, вероятнее всего, они не содержат смысла.

Одной из основных функций рассматриваемой интеллектуальной системы управления движением судна является *регулирование*, т. е. поддержание на определенном уровне или изменение по требуемому закону некоторой величины (например, курса) в системах управления судном [12]. Устройство, решающее задачу регулирования, называется *регулятором*, в качестве которого в описываемой системе выступает человек (судоводитель). В данном случае управляемая величина должна одновременно удовлетворять требованиям человека и возможностям машины. Другими словами, она должна обеспечить «паритет» между человеческим и машинным факторами. Для обоснования выбора такой управляемой величины следует обратиться к выражению, по которому рассчитывается дифференциальная энтропия экспоненциального распределения случайной величины:

$$h(\Delta H) = 1 - \ln \lambda,$$

где λ — параметр экспоненциального распределения (интенсивность, или обратный коэффициент масштаба).

Конкретное значение параметра λ связано с выбором шкалы измерения. При разработке интеллектуальной системы управления движением морского судна параметр λ может быть интерпретирован как среднее время, затрачиваемое судоводителем на принятие одного решения, т. е. интенсивность¹. Другими словами, этот параметр показывает интенсивность принятия решений судоводителем:

$$\lambda = 1/t_{\text{ср}},$$

где $t_{\text{ср}}$ — среднее время принятия решений судоводителем за определенный промежуток движения по траектории l .

Блоки 4–6 на рис. 2 объединены пунктирной линией в единый блок — *Машина (судно)*, в котором вырабатывается машинный фактор. Рассмотрим отдельные блоки, входящие в его состав.

Блок 4 — вычислительный блок. В нем осуществляется поэтапная (многошаговая) процедура учета возможностей машины, которую можно представить в виде решения следующей динамической задачи исследования операций.

Формулировка задачи. Предположим, что судно движется из текущей точки с координатами (x_{1i}, x_{2i}) в заданную точку (x_{1i+1}, x_{2i+1}) — рис. 4, с постоянной скоростью $v(t)$ как функцией времени t , затрачиваемого на перемещение из одной точки в другую. Необходимо найти такую программу управления рулями U , которая обеспечивает движение судна из начальной точки в заданную в течение минимального времени.

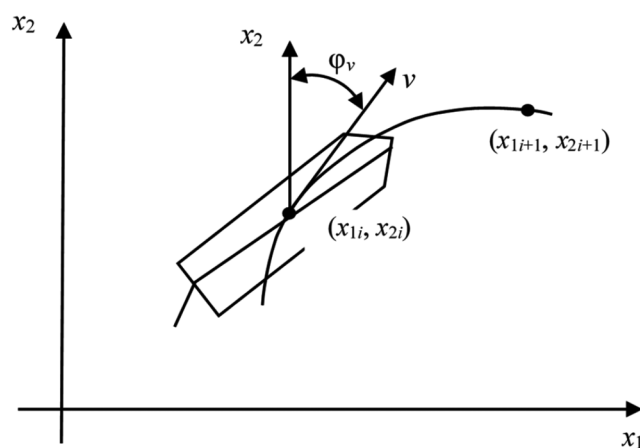


Рис. 4. Оси координат и элементы неустановившегося движения судна

¹ Кроме общепринятого определения: «интенсивность процесса — это результат процесса, отнесенный к единице времени и единице его рабочего параметра», интенсивность можно трактовать как напряженность, энергичность, сосредоточенность, запас внутренних сил.

Математическая модель задачи. Уравнения движения судна можно представить в следующем виде:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = v \sin \varphi_v; \\ \dot{x}_2(t) = v \cos \varphi_v, \end{cases} \quad (2)$$

где φ_v — угол скорости.

Множество допустимых решений G представляет собой совокупность вектор-функций $(x_1(t), x_2(t))^T$, удовлетворяющих системе уравнений:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = v \sin \varphi_v; \\ \dot{x}_2(t) = v \cos \varphi_v; \\ x_1(t_i) = x_{1i}, x_2(t_i) = x_{2i}, x_1(t_{i+1}) = x_{1i+1}, x_2(t_{i+1}) = x_{2i+1}; \\ t \in (t_i, t_{i+1}). \end{cases} \quad (3)$$

Так как время прибытия в заданную точку траектории движения зависит от программы управления рулями судна U , т. е. $t_{i+1} = f(U)$, в соответствии с условиями задачи критерий оптимальности будет иметь следующий вид:

$$t_{i+1} - t_i \rightarrow \min_{U \in G}. \quad (4)$$

Блок 5 — датчик интенсивности машинного фактора. В нем рассчитывается и измеряется интенсивность возможностей исполнения машиной, принимаемых судоводителем решений, которую можно представить в виде

$$\Lambda = 1/T_{\text{ср}}, \quad (5)$$

где $T_{\text{ср}}$ — среднее время, необходимое машине на «отработку» принимаемых судоводителем решений за определенный промежуток движения по траектории l .

Избрав в качестве управляемой величины внутреннего контура интеллектуальной системы управления движением судна для судоводителя интенсивность принятия решений λ , а для машины — интенсивность исполнения принятых судоводителем решений Λ , с их помощью можно установить «паритет» между человеческим и машинным факторами. Для этого во временной шкале рассчитываются и затем сравниваются с помощью элемента b внутреннего контура управления (см. рис. 2) значения λ и Λ :

- если $\lambda = \Lambda$, то принимается окончательное решение (человеческий и машинный факторы находятся в «паритете»);
- если $\lambda < \Lambda$, то необходимо уменьшить интервал между моментами принятия решений, тем самым увеличив их интенсивность (машинный фактор превышает возможности человеческого фактора);
- если $\lambda > \Lambda$, то можно увеличить интервал между моментами принятия решений (человеческий фактор превышает возможности машинного фактора).

Используя понятие интенсивности, можно по аналогии с формулировкой человеческого фактора сформулировать понятие *машинного фактора судовождения* как статистического параметра, измеряющего среднее количество энтропии вероятностного состояния системы «судоводитель – судно», приходящееся на одно принятое судоводителем решение за время, необходимое машине для его выполнения.

В случае, если $\lambda = \Lambda$ и судоводитель принимает окончательное решение, то активируется внешний контур управления и выходной сигнал о принятом решении поступает на **Блок 8** — датчик навигационной переменной величины, измеряющий управляемую величину (например, курс судна) и передающий полученные данные на элемент сравнения внешнего контура управления **9** (см. рис. 2). Далее в зависимости от величины и знака отклонения рассчитанного значения управляемой величины от ее фактического значения судоводитель принимает решение о целе-

сообразности дальнейших умозаключений (принятий решений) в сложившейся навигационной обстановке. Если при рассогласовании между рассчитанным значением управляемой величины и ее фактическим значением будет принято положительное решение о необходимости продолжения умозаключений (анализа навигационной обстановки), то описанные действия по внутреннему контуру повторяются.

В качестве примера рассмотрим абстрактную¹ ситуацию сближения судна с объектом маневра, представленную отдельными событиями — семантическими знаками в виде промежуточных точек траектории движения, описывающими программу действий судоводителя (табл. 1) [9].

Таблица 1

Программа действий судоводителя

Точки	0–1	1–2	2–3	3–4	4–5	5–6	6–7	7–8	8–9	9–10	10–11	11–12	12–13	13–14	14–15
ΔT , мин	3,23	0,03	3,23	0,16	2,26	2,26	2,26	0,16	1,61	1,61	1,61	0,03	0,32	0,16	0,03
l , м	1000	1000	1000	50	700	700	700	50	500	500	500	10	100	50	10

Известны скорость судна V , время плавания между точками ΔT , длина всей траектории сближения L и длина траектории между соседними точками l . Траектория движения объекта маневра также разбита на отдельные точки, которые соответствуют точкам на траектории судна. Ситуация сближения судна с объектом маневра показана на рис. 5.

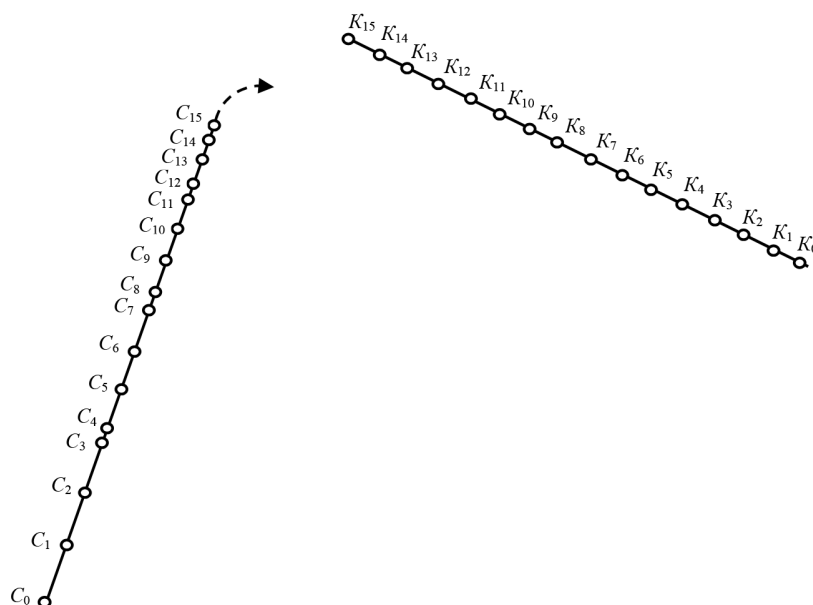


Рис. 5. Ситуация сближения судна с объектом маневра:
С — судно; К — объект маневра

Точки на траектории движения судна (см. рис. 5) имеют двойственное значение: с одной стороны, это *вещественные знаки* (точки, в которых определялись параметры сближения), с другой — *смыслообразующие элементы* (точки, в которых принимались решения). Неравномерный характер распределения точек по траектории движения судна, плотность которых возрастает с уменьшением расстояния до объекта маневра, является косвенным доказательством того, что в этих точках судоводителем принимались решения с увеличивающейся интенсивностью.

Расчеты для исходных событий (промежуточных точек) выполняются в соответствии с пп. 1–6 разработанного алгоритма [9, с. 97] оценки величины смысла в смысловой форме произвольного типа. Полученные результаты показали, что дифференциальная энтропия экспоненциального распределения случайной величины ΔH исходной смысловой формы (программы действий

¹ Приведенный пример служит иллюстрацией полученных результатов.

судоводителя): $h(\Delta H) = 1 - \ln(\lambda) = 1 - \ln(0,319858) = 2,139878$, т. е., согласно методике оценки величины смысла, $M_s = h(\Delta H) = 2,139878$ ¹.

Исходная программа действий судоводителя приводится к эталонному виду путем случайной перестановки семантических знаков, в результате чего она примет спонтанный вид без каких-либо явных признаков осмысленности действий (табл. 2). Количество смысла в такой программе действий можно считать равным нулю.

Таблица 2

Эталонная программа действий судоводителя

Точки	9–10	0–1	5–6	12–13	14–15	13–14	10–11	2–3	8–9	6–7	1–2	4–5	11–12	3–4	7–8
ΔT , мин	1,61	3,23	2,26	0,32	0,03	0,16	1,61	3,23	1,61	2,26	0,03	2,26	0,03	0,16	0,16
l , м	500	1000	700	100	10	50	500	1000	500	700	1000	700	10	50	0

Расчеты эталонных событий выполняются согласно пп. 1–6 алгоритма оценки смысла [9, с. 97]. Дифференциальная энтропия экспоненциального распределения случайной величины ΔH эталонной программы действий судоводителя $h(\Delta H) = 1 - \ln(\lambda) = 1 - \ln(0,396001) = 1,926339$. Принимаем $M_p = h(\Delta H) = 1,926339$. Сравнение полученных значений оценочных статистических параметров исходной M_s и эталонной M_p смысловых форм показывает, что $M_s > M_p$. Следовательно, исходная программа действий судоводителя все-таки содержит смысл. Полученное умозаключение «программа действий содержит смысл» включает программу управления рулями судна U для сложившейся к этому моменту навигационной обстановки.

Интенсивность принятия решений судоводителем для заданного примера² $\lambda = 1/t_{cp} = 1/1,48 = 0,67 \text{ мин}^{-1}$. Для расчета интенсивности возможностей исполнения машиной принимаемых судоводителем решений Λ используется математическая модель задачи учета возможностей машины, представленная выражениями (2)–(4) и формулой (5). В этой формуле время, необходимое машине на «отработку» принимаемых судоводителем решений T_{cp} , рассчитывается как среднее значение промежутков времени, найденных с помощью критерия оптимальности (4). По результатам расчетов, согласно данным на рис. 5, принимаются следующие решения:

- если $\lambda < \Lambda$ (точки C_0 – C_3 , C_4 – C_7), то необходимо увеличить интенсивность принятия решений;
- если $\lambda > \Lambda$ (точки C_3 – C_4 , C_7 – C_8), то интенсивность принятия решений может быть уменьшена;
- если $\lambda = \Lambda$ (точки C_{13} – C_{14}), то принимается окончательное решение по расхождению с объектом маневра, полученное путем формальной логической проработки задачи управления для сложившейся навигационной обстановки в математическом виде. В рассмотренном примере это изменение курса судна вправо.

При рассогласовании между рассчитанным значением управляемой величины и ее фактическим значением в процессе выполнения маневра расхождения судоводитель принимает решение о целесообразности дальнейших умозаключений в сложившейся навигационной обстановке, которые в случае необходимости вновь повторяются по внутреннему контуру управления (см. рис. 2).

Заключение (Conclusion)

В контексте кибернетического подхода к решению проблемы человеческого фактора в судовождении этот фактор оказывается тесно связан с таким понятием, как смысл. *Смысл* — это статистический параметр, измеряющий среднее количество энтропии, приходящейся на одно умозаключение. Смысл как статистический параметр показывает осмысленность и эффективность принимаемых решений, приводящих к положительному результату.

Человеческий фактор судовождения — это статистический параметр, который измеряет среднее количество энтропии вероятностного состояния системы «судоводитель – судно», приходящееся на одно принятое судоводителем решение. Принятию решений судоводителем должна предшествовать формальная логическая проработка задачи управления в математическом виде.

¹ Здесь и при расчете эталонной программы действий судоводителя параметр экспоненциального распределения λ соответствует смысловой шкале измерений.

² В данном случае параметр экспоненциального распределения λ соответствует шкале времени.

Машинный фактор можно считать понятием, тождественным человеческому фактору, но относящимся к машине. Это статистический параметр, измеряющий среднее количество энтропии вероятностного состояния системы «судоводитель – судно», приходящееся на одно принятое судоводителем решение в течение времени, необходимого машине для его выполнения.

Учет *человеческого фактора* представляет собой поэтапную (многошаговую) процедуру установления смысла в действиях человека с принятием во внимание возможностей машины при реализации принятых решений. Другими словами, учет человеческого фактора — это поэтапный процесс нахождения «паритета» между человеческим и машинным факторами, учитывающий интенсивность принятия решений человеком и интенсивность их реализации машиной.

Перешагнув барьер смысла («Barrier of Meaning») [13], можно вплотную приблизиться к созданию искусственного разумного существа, которое сможет самостоятельно управлять «безэкипажным» судном. Возможность создания подобной машины, способной мыслить, рассмотрена в статье академика А. Н. Колмогорова «Автоматы и жизнь» (Возможное и невозможное в кибернетике: сб. ст. / Сост. В. Д. Пекелис; под ред. А. И. Берга и Э. Я. Кольмана. — М.: Наука, 1964. — 222 с.), в которой автор отмечает следующее: «...не существует принципиальных аргументов против положительного ответа на вопрос о возможности создания искусственного разумного существа...». Остается присоединиться к мнению выдающегося ученого и надеяться, что результаты изложенного в данной статье исследования будут способствовать созданию систем поддержки принятия решений нового класса по типу *социокиберфизических* [14] и *человеко-машинных систем* [15] и, возможно, созданию искусственного разумного существа, способного управлять «безэкипажным» судном.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сведения об аварийности с судами на море и внутренних водных путях в I квартале 2022 года [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://rostransnadzor.gov.ru/documents/1322> (дата обращения 05.01.2023).
2. Wen W. The sense of agency in driving automation / W. Wen, Y. Kuroki, H. Asama // *Frontiers in Psychology*. — 2019. — Vol. 10. — Pp. 2691. DOI: 10.3389/fpsyg.2019.02691.
3. Wen W. The sense of agency in perception, behaviour and human-machine interactions / W. Wen, H. Imamura // *Nature Reviews Psychology*. — 2022. — Vol. 1. — Is. 4. — Pp. 211–222. DOI: 10.1038/s44159-022-00030-6.
4. Винер Н. Кибернетика, или управление и связь в животном и машине / Н. Винер / Пер. с англ.; под ред. Г. Н. Поварова. — 2-е изд. — М.: Наука, 1983. — 343 с.
5. Филлипс Ч. Системы управления с обратной связью / Ч. Филлипс, Р. Харбор. — М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. — 616 с.
6. Сазонов А. Е. Человеческий фактор и безопасность управления подвижными объектами / А. Е. Сазонов // Сб. мат. XVI Общего собрания академии навигации и управления движением. — 2003. — С. 6–8.
7. Haggard P. Sense of agency / P. Haggard, V. Chambon // *Current biology*. — 2012. — Vol. 22. — Is. 10. — Pp. R390–R392. DOI: 10.1016/j.cub.2012.02.040.
8. Inga J. Human-machine symbiosis: A multivariate perspective for physically coupled human-machine systems / J. Inga, M. Ruess, J. H. Robens, T. Nelius, S. Rothfuß, S. Kille, P. Dahlinger, A. Lindenmann, R. Thomaschke, G. Neumann, S. Matthiesen, S. Hohmann, A. Kiesel // *International Journal of Human-Computer Studies*. — 2023. — Vol. 170. — Pp. 102926. DOI: 10.1016/j.ijhcs.2022.102926.
9. Фадюшин С. Г. Вероятностная оценка смыслов. Логико-философский анализ проблемы смысла в кибернетике: моногр. / С. Г. Фадюшин. — Владивосток: Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2022. — 196 с.
10. Fadyushin S. G. Nalimov's Bayesian Syllogism to Overcome the Barrier of Meaning in AI Systems / S. G. Fadyushin, E. A. Vereshchagina, Y. V. Pafnuteva // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). — IEEE, 2020. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271411.
11. Фадюшин С. Г. Математическое описание количественной оценки принятия решений судоводителем / С. Г. Фадюшин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 239–251. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-239-251.
12. Каретников В. В. Автоматизация судовождения: учебник для студентов судоводительской специальности / В. В. Каретников, В. Д. Ракитин, А. А. Сикарев. — СПб.: СПГУВК, 2007. — 265 с.
13. Mitchell M. Artificial Intelligence Hits the Barrier of Meaning / M. Mitchell // *Information*. — 2019. — Vol. 10. — Is. 2. — Pp. 51. DOI: 10.3390/info10020051.

14. Смирнов А. В. Модели поддержки принятия решений в социокиберфизических системах / А. В. Смирнов, Т. В. Левашова // Информационно-управляющие системы. — 2019. — № 3 (100). — С. 55–70. DOI: 10.31799/1684-8853-2019-3-55-70.

15. Смирнов А. В. Поддержка принятия решений на основе человеко-машинного коллективного интеллекта: современное состояние и концептуальная модель / А. В. Смирнов, Т. В. Левашова, А. В. Пономарев // Информационно-управляющие системы. — 2020. — № 2 (105). — С. 60–70. DOI: 10.31799/1684-8853-2020-2-60-70.

REFERENCES

1. Svedeniya ob avariynosti s sudami na more i vnutrennikh vodnykh putyakh v I kvartale 2022 goda. Web. 5 Jan. 2023 <<https://rostransnadzor.gov.ru/documents/1322>>.
2. Wen, Wen, Yoshihiro Kuroki, and Hajime Asama. “The sense of agency in driving automation.” *Frontiers in Psychology* 10 (2019): 2691. DOI: 10.3389/fpsyg.2019.02691.
3. Wen, Wen, and Hiroshi Imamizu. “The sense of agency in perception, behaviour and human–machine interactions.” *Nature Reviews Psychology* 1.4 (2022): 211–222. DOI: 10.1038/s44159-022-00030-6.
4. Wiener, Norbert. *Cybernetics: or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Second edition. The MIT Press, 1965.
5. Phillips, Charles L., and Royce D. Harbor. *Feedback Control Systems*. 4th Edition. Prentice Hall, 2000.
6. Sazonov, A. Ye. “Chelovecheskiy faktor i bezopasnost’ upravleniya podvizhnymi ob’ektami.” *Sbornik materialov XVI Obshchego sobraniya akademii navigatsii i upravleniya dvizheniyem*. 2003: 6–8.
7. Haggard, Patrick, and Valerian Chambon. “Sense of agency.” *Current biology* 22.10 (2012): R390–R392. DOI: 10.1016/j.cub.2012.02.040.
8. Inga, Jairo, Miriam Ruess, Jan Heinrich Robens, Thomas Nelius, Simon Rothfuß, Sean Kille, Philipp Dahlinger, Andreas Lindenmann, Roland Thomaschke, Gerhard Neumann, Sven Matthiesen, Sören Hohmann, and Andrea Kiesel. “Human-machine symbiosis: A multivariate perspective for physically coupled human-machine systems.” *International Journal of Human-Computer Studies* 170 (2023): 102926. DOI: 10.1016/j.ijhcs.2022.102926.
9. Fadyushin, S. G. *Veroyatnostnaya otsenka smyslov. Logiko-filosofskiy analiz problemy smysla v kibernetike*. Vladivostok: Izdatel’sтво Dal’nevost. federal. un-ta, 2022.
10. Fadyushin, S. G., E. A. Vereshchagina, and Ya. V. Pafnuteva. “Nalimov’s Bayesian Syllogism to Overcome the Barrier of Meaning in AI Systems.” *2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. IEEE, 2020. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271411.
11. Fadyushin, Sergey G. “Mathematical description of the quantitative assessment of decisions making by the navigator.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 239–251. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-239-251.
12. Karetnikov, V. V., V. D. Rakitin, and A. A. Sikarev. *Avtomatizatsiya sudovozhdeniya: uchebnyk dlya studentov sudovoditel’skoi spetsial’nosti*. SPb.: Sankt-Peterburgskii gos. un-t vodnykh kommunikatsii, 2007.
13. Mitchell, Melanie. “Artificial intelligence hits the barrier of meaning.” *Information* 10.2 (2019): 51. DOI: 10.3390/info10020051.
14. Smirnov, A.V., and T. V. Levashova. “Models of decision support in socio-cyber-physical systems.” *Information and Control Systems* 3(100) (2019): 55–70. DOI: 10.31799/1684-8853-2019-3-55-70.
15. Smirnov, A.V., T. V. Levashova, and A. V. Ponomarev. “Decision support based on human-machine collective intelligence: state-of-the-art and conceptual model.” *Information and Control Systems* 2(105) (2020): 60–70. DOI: 10.31799/1684-8853-2020-2-60-70.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Фадюшин Сергей Геннадьевич —
кандидат технических наук, доцент
Дальневосточный федеральный университет
690091, Российская Федерация,
г. Владивосток, Суханова, 8
e-mail: fadyushin.sg@dvfu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Fadyushin, Sergey G. —
PhD, associate professor
Far Eastern Federal University
8 Sukhanova Str., Vladivostok, 690090,
Russian Federation
e-mail: fadyushin.sg@dvfu.ru

Статья поступила в редакцию 21 октября 2022 г.
Received: October 21, 2022.